



УДК 669.15:669.018:543.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-10-10

**СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
НИОБИЯ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ,  
СОДЕРЖАЩИХ ТАНТАЛ**

Н.В. Гундобин

*кандидат химических наук*

В.И. Титов

*кандидат технических наук*

Л.В. Пилипенко

Р.М. Дворецков

**Август 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*Н.В. Гундобин<sup>1</sup>, В.И. Титов<sup>1</sup>, Л.В. Пилипенко<sup>1</sup>, Р.М. Дворецков<sup>1</sup>*

## **СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИОБИЯ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ, СОДЕРЖАЩИХ ТАНТАЛ**

*Разработана методика спектрофотометрического определения массовой доли Nb в жаропрочных никелевых сплавах в диапазоне концентраций 0,5–3,5% (по массе) при одновременном содержании в сплавах Ta (0,5–6,0% (по массе)). Для повышения точности и чистоты проведения анализа, Nb и Ta предварительно отделяются от мешающих компонентов и основы сплава феноларсоновой кислотой. Мешающее влияние Zr и Hf, которые осаждаются вместе с Nb и Ta, устраняется связыванием их в прочный комплекс комплексоном III. Анализ ведется с реагентом сульфонитразо Э с последующим спектрофотометрическим измерением оптической плотности раствора при длине волны  $\lambda=560$  нм. Расчет содержания Nb производится по стандартным образцам никелевого сплава с аттестованным содержанием Nb, проведенным через все стадии анализа с добавлением стандартного раствора Ta в количестве, равном его содержанию в анализируемом сплаве.*

**Ключевые слова:** *спектрофотометрия, сульфонитразо Э, органические реагенты, феноларсоновая кислота, оптическая плотность, стандартный образец, мешающий фактор, винная кислота, градуировочный график, аликвотная часть, относительная погрешность, жаропрочные никелевые сплавы, цветные комплексные соединения, ниобий, тантал, гафний, цирконий, адденд.*

*N.V. Goundobin, V.I. Titov, L.V. Pilipenko, R.M. Dvoretsov*

## **SPEKTROFOTOMETRIC DEFINITION NIOBIUM IN THE HEAT RESISTING NICKEL ALLOYS CONTAINING TANTALUM**

*The technique definitions of mass fraction Nb in heat resisting nickel alloys in a range of concentration of 0,5–3,5% of weights by absorption spectrofotometrical method is developed at the simultaneous maintenance in alloys Ta (0,5–6,0% of weights). For increase of accuracy and cleanliness of carrying out of analysis Nb and Ta preliminary separates from disturbe components and from basis of alloy by phenilarsenium*

*acid. The disturbe cous of Zr and Hf, what separates together with Nb and Ta, separetes with binding it's a stable complex with a reagent complexon III. The analysis is conducted with a reagent sulphonitrazo E by spectrofotomtrical measurement of optical density of a solution on length of a wave  $\lambda=560$  nanometers. Calculation of mainte-nance Nb is made on the standard sample of a nickel alloy with the certified mainte-nance Nb spent through all stadies of the analysis with addition in its a standart solu-tion Ta in quantity equal its maintenance in the analyzed alloy.*

**Keywords:** *spectrofotometry, sulphonitrazo E, organic reagents, phenilarsenium ac-id, optical density, the standard sample stirring the factor, wine acid, calibrery the schedule, aliquota a part, a relative error, heat resisting nickel alloys, colour complex connections, niobium, tantalum, haphnium, zirconium, addend.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

### **Введение**

При разработке нового поколения жаропрочных сплавов и систематическом усовершенствовании существующих жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) для перспективных ГТД нового поколения (например, таких как двигатель второго этапа ПАК ФА, энергетические установки мощностью 250 МВт и более) с высокоэффективным транспирационным или проникающим охлаждением лопаток, позволяющим увеличить температуру газа перед турбиной до 2100–2200 К и создать практически «стехиометрический» газотурбинный двигатель, требуется применение особых технологических приемов для изготовления необходимых сплавов и полуфабрикатов [1]. Для этого необходимо:

– комплексное легирование, в том числе танталом, ниобием, рением, со сбалансированным химическим составом и ограничением температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы [2];

– снижение содержания вредных примесей;

– микролегирование – введение в сплав РЗМ [3, 4];

– формирование  $\gamma'$ -фазы [5, 6] требуемого размера путем термической обработки с последующей закалкой как выше, так и ниже температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы [7–9];

– применение регламентированного и ускоренного охлаждения [10].

К числу современных разработок относится создание новых жаропрочных композиционных материалов (КМ) систем Nb–Si и Mo–Si–B [11] – эвтектических композитов семейства ВКЛС со структурой  $\gamma/\gamma'$ -MeC. Структурной основой сплавов семейства ВКЛС служат простые эвтектики (Ni–NbC или Ni–TaC), которые после легирования и направленной кристаллизации превращаются в нитевидные монокристаллы (волокна) сложного химического состава [12].

Существенное повышение эксплуатационных характеристик современных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) достигается путем применения разработанных в ВИАМ уникальных эффективных способов рафинирования металла от примесей в вакууме, что позволяет получить химический состав сплава с более узкими (в 3 раза) пределами легирования (по сравнению с серийными условиями выплавки) и обеспечить получение ультрачистого металла [10]. Из последних разработок можно выделить дисковый высокожаропрочный деформируемый никелевый сплав нового поколения ВЖ175, относящийся к классу дисперсионно-твердеющих сплавов, предназначенный для изготовления дисков и других высокотемпературных деталей ГТД и ГТУ [7]. Сплав легирован Co, Cr, W, Mo, Nb, Al, Ti и макродобавками B, La, Sc, Ce; упрочнен интерметаллидными нано- и микрочастицами  $\gamma'$ -фазы сложного состава, а также мелкодисперсной карбидной фазой типа (Nb, Ti)C и боридной фазой типа (Mo, Cr, W, Co)<sub>3</sub>B<sub>2</sub> [13]. Для улучшения пластичности и однородности труднодеформируемых гетерофазных сплавов используется процесс контролируемой динамической рекристаллизации [14]. Для повышения ресурса деталей ГТД используются современные ионно-плазменные защитные покрытия [3, 15–17], а также новая технология нанесения защитного покрытия – керамического слоя ТЗП – реактивное магнетронное осаждение при повышенной частоте [18].

Химический состав по многим элементам представленных выше сплавов контролируется по стандартизованным методикам анализа (ГОСТ, ОСТ, МИ и др.), однако в связи с систематически проводимой работой по совершенствованию сплавов, изменению пределов содержаний и соотношения вновь вводимых в сплавы элементов легирования возникают задачи создания новых методик и совершенствования действующих методик анализа. Одним из трудноопределяемых элементов из числа легирующих в жаропрочных никелевых сплавах при одновременном присутствии в сплавах мешающих элементов (тантала, циркония, гафния) является ниобий. С целью достоверного контроля содержания ниобия в ЖНС, проведена разработка методики фотометрическо-

го определения ниобия в диапазоне 0,5–3,5% (по массе) при содержании в сплавах 0,5–6,0% (по массе) тантала, а также гафния и циркония.

Описанные в литературе методы анализа с отделением друг от друга Nb, Ta и других мешающих элементов (Zr, Hf, Ti, W, Mo), особенно когда содержание одного компонента превалирует над содержанием другого, являются трудоемкими и не всегда отвечают требуемому уровню точности [19–22]. Кроме того, эти методы не распространяются на жаропрочные никелевые сплавы.

Спектрофотометрические методы определения Nb считаются менее трудоемкими и наиболее селективными и чувствительными по сравнению с высокоточными гравиметрическими методами, для чего используются специальные органические реагенты, образующие с Nb в растворах окрашенные комплексные соединения [22].

### Материалы и методы

Для проведения исследований и разработки методики анализа ЖНС, содержащих тантал, на содержание ниобия применяются следующие материалы и методы:

– смесь кислот – 3 части HCl (плотностью  $d=1,19$  г/см<sup>3</sup>) и 1 часть HNO<sub>3</sub> (плотностью  $d=1,40$  г/см<sup>3</sup>);

– кислота соляная HCl – концентрированная (плотностью  $d=1,19$  г/см<sup>3</sup>), разбавленная (1:1);

– кислота азотная HNO<sub>3</sub> – концентрированная (плотностью  $d=1,40$  г/см<sup>3</sup>);

– кислота серная H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – концентрированная (плотностью  $d=1,84$  г/см<sup>3</sup>);

– кислота винная – с концентрацией 50 и 15%;

– реагент сульфонитразо Э – 0,1%-ный водный раствор;

– кислота фениларсоновая – 5%-ный водный раствор;

– комплексон III – 0,1 н. водный раствор;

– фоновый раствор, приготовленный из 10 мл серной кислоты (плотностью  $d=1,84$  г/см<sup>3</sup>), разбавленной водой в мерной колбе вместимостью 500 мл с добавлением 20 г винной кислоты;

– стандартный раствор ниобия, приготовленный следующим методом, – 0,1 г ниобия металлического, прокаленного в муфельной печи до оксида Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, сплавляют в муфельной печи в кварцевом тигле с 3 г пиросульфата калия при температуре 1000°C; затем плав выщелачивают в концентрированной серной кислоте (плотностью  $d=1,84$  г/см<sup>3</sup>), переводят раствор в мерную колбу вместимостью 100 мл и доводят до метки концентрированной серной кислотой с титром по ниобию – T<sub>Nb</sub>=1 мг/мл;

– стандартный раствор тантала, приготовленный следующим методом, – 0,1 г тантала металлического, прокаленного в муфельной печи до оксида  $Ta_2O_5$ , сплавляют в муфельной печи в кварцевом тигле с 3 г пиросульфата калия при температуре  $1000^\circ C$ ; затем плав выщелачивают в концентрированной серной кислоте (плотностью  $d=1,84 \text{ г/см}^3$ ), переводят раствор в мерную колбу вместимостью 100 мл и доводят до метки концентрированной серной кислотой с титром по танталу –  $T_{Ta}=1 \text{ мг/мл}$ ;

– жидкость для промывания, приготовленная следующим методом, – 10 г фениларсоновой кислоты помещают в колбу вместимостью 1 л, добавляют 100 мл раствора  $HCl$  (плотностью  $d=10 \text{ г/дм}^3$ ), нагревают до растворения фениларсоновой кислоты, охлаждают и разбавляют раствором  $HCl$  той же плотности до метки.

При проведении исследований используется спектрофотометр марки ПЭ-5400В.

Задача по определению ниобия в ЖНС, в которых одновременно присутствуют  $Ta$  и такие элементы, как  $Zr$ ,  $Hf$ ,  $W$ ,  $Mo$ ,  $Co$ ,  $Cr$  и другие, решалась в несколько этапов. Вначале для фотометрического метода определения  $Nb$  выбирали соответствующий чувствительный реагент на основе широко описанного в литературе [22, 23] опыта исследования зависимости между строением органических реагентов и их способностью давать цветные комплексные соединения с  $Nb$ ; также в работах [22, 23] подробно описаны спектрофотометрические методы с наиболее перспективными для  $Nb$  органическими реагентами, применяемыми для анализа металлов, сталей и других материалов.

Из наиболее чувствительных к  $Nb$  реагентов – сульфохлорфенол  $C$ , пиридилазорезорцин (ПАР), сульфанилазо  $\mathcal{E}$  – выбрали сульфанилазо  $\mathcal{E}$ . Он дает устойчивую окраску с  $Nb$  в широком интервале кислотности и в меньшей степени зависит от присутствия окислителей и восстановителей в растворе, чем два других реагента, при этом  $Ta$ , присутствующий в сплаве, цветной реакции с сульфанилазо  $\mathcal{E}$  не дает при кислотности раствора 1–3 н. по  $HCl$ . Однако в этих условиях он занижает оптическую плотность  $Nb$  с сульфанилазо  $\mathcal{E}$ . Для поддержания устойчивости ниобиевого комплекса в водный раствор вводили аддендообразователь – винную кислоту, иначе ниобиевые комплексы гидролизуются, образуют полимеры и выпадают в осадок. Проверку степени влияния  $Ta$  на реакцию  $Nb$  с сульфанилазо  $\mathcal{E}$  осуществляли на основе градуировочных графиков зависимости оптической плотности  $Nb$  в искусственно приготовленных растворах на чистых сернокислых солях  $Nb$  с добавлением пропорционального количества  $Ta$  и без него. Графики строили по раствору чистого  $Nb$  и ниобия, смешанного с  $Ta$ , в диапазоне концентраций (5–80)  $\text{мкг/50 мл}$ . Для приготовления таких искусственных смесей брали сернокислые стандартные растворы  $Nb$  и  $Ta$ , смешивали их в различ-

ных соотношениях и разбавляли винной кислотой в мерных колбах вместимостью 100 мл. Далее отбирали аликвотную часть и проводили фотометрирование при длине волны  $\lambda=560$  нм на спектрофотометре ПЭ-5400В. Из построенных градуировочных графиков, имеющих в данном диапазоне концентраций прямолинейный характер, график растворов Nb с Ta имел меньший угол наклона по сравнению с графиком растворов, содержащих только Nb, т. е. Ta занижает оптическую плотность Nb. Данные полученных измерений содержания Nb представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты определения содержания Nb в градуировочных растворах смеси Nb и Ta**

Состав смеси, мг		Соотношение содержания Nb/Ta	Количество элемента в аликвотной части, мкг		Определено Nb, мкг	Относительная погрешность определений, %
Nb	Ta		Nb	Ta		
1,0	1,0	1:1	20	20	20,2	1,0
2,0	3,0	1:1,5	40	60	39,5	1,2
1,5	3,0	1:2	30	60	28,95	3,5
2,5	7,5	1:3	50	150	46,0	8,0
2,0	10,0	1:5	40	200	36,0	10,0

Из сравнения значений относительных погрешностей видно (см. табл. 1), что Ta не мешает определению Nb до соотношения Nb:Ta=1:1,5. При увеличении содержания Ta от соотношения 1:1,5 и выше, Ta заметно препятствует развитию окраски Nb. При этом максимальная относительная погрешность увеличивается до 10% (отн.). Такое аномальное влияние тантала на занижение оптической плотности раствора ниобия с сульфонитразо Э или с любым другим реагентом в аналитической химии ниобия принято называть «частичной потерей индивидуальных свойств» [23].

Мешающее влияние на определение ниобия проявляют также Zr и Hf при кислотности раствора 1–3 н. по HCl, так же образующие с сульфонитразо Э окрашенный комплекс.

Для того чтобы повысить точность определения ниобия в ЖНС, содержащих помимо Ta, Zr и Hf еще Cr, Mo, Cu и другие элементы, необходимо провести отделение Nb и Ta от большинства легирующих элементов и от основы сплава. Для этого применяют фениларсоновую кислоту. Осаждение Nb проводят в присутствии 0,3–3 н. HCl. При этом Nb, Ta, а также Zr и Hf выпадают в виде белого хлопьевидного осадка [23]. Помехи со стороны Ta устраняют введением его в растворы стандартных образцов ЖНС, не содержащих тантал в количестве, равном его содержанию в анализируемом сплаве. Мешающее влияние Zr и Hf, осаждающихся совместно с Nb и Ta, устраняется связыванием их в прочный комплекс комплексоном III. Мешающие определению Nb с

сульфонитразо Э Мо, Си, Со, Ст и другие элементы (при осаждении Nb фениларсоновой кислотой) остаются в растворе.

### **Выполнение анализа**

Навески анализируемого сплава и стандартных образцов ЖНС в соответствии со схемой, представленной в табл. 2, помещают в стакан или коническую колбу вместимостью 150 мл, растворяют в смеси 30 мл HCl (плотностью  $d=1,19$  г/см<sup>3</sup>) и 10 мл HNO<sub>3</sub> (плотностью  $d=1,40$  г/см<sup>3</sup>) при нагревании на электроплите.

Таблица 2

#### **Схема отбора пробы сплава и соответствующей аликвотной части раствора для анализа**

Диапазон содержания Nb в сплаве, % (по массе)	Навеска сплава, г	Аликвотная часть раствора для фотометрирования, мл/мл
0,5–1,0	0,2	2,0/50
1,0–2,0	0,1	2,0/50
2,0–3,5	0,1	1,0/50

После растворения навески сплава растворы упаривают досуха. Если содержание Та в анализируемом сплаве превышает содержание Nb более чем в 2 раза, то к сухому остатку стандартных образцов добавляют стандартный раствор Та в количестве, соответствующем содержанию Та в анализируемом сплаве. Затем к каждому образцу добавляют 10 мл HCl (плотностью  $d=1,19$  г/см<sup>3</sup>), 10 мл 15%-ной винной кислоты, 80–100 мл воды, нагревают до кипения и прибавляют 50 мл горячего раствора 5%-ной фениларсоновой кислоты. Растворы кипятят 2–3 мин и оставляют на ночь на теплой плите, добавив в стаканы немного фильтрующей бумажной массы. Осадки отфильтровывают через плотный фильтр (синяя лента), промывают 10–12 раз раствором для промывания, затем помещают в фарфоровые тигли, подсушивают и прокаливают в муфельной печи при температуре 1000°С до образования оксидов. Полученные оксиды сплавляют с 2 г пиросульфата калия и выщелачивают в воде, содержащей 10 мл 50%-ного раствора винной кислоты. Растворы переводят в мерные колбы вместимостью 100 мл и доводят водой до метки.

Для фотометрирования отбирают аликвотную часть подготовленных растворов в соответствии с данными табл. 2 – в каждую мерную колбу вместимостью 50 мл добавляют фоновый раствор до объема 5 мл (включая аликвотную часть). При наличии в сплавах Zr и Hf во все растворы вводят по 2 мл 0,1 н. раствора комплексона III, выдерживают 10 мин, добавляют по 9 мл раствора соляной кислоты (1:1), разбавляют водой до объема 40 мл, затем пипеткой вводят по 3 мл раствора реагента сульфанилазо Э и разбавляют водой до метки. Растворы нагревают на водяной бане в течение 15 мин (или

выдерживают 60 мин без нагревания) для развития окраски комплексов и измеряют оптическую плотность растворов в кювете с толщиной поглощающего слоя 50 мм. В качестве раствора сравнения используют «холостую» пробу: 5 мл фонового раствора+все реактивы, используемые при фотометрировании Nb.

### Результаты

Содержание ниобия находят по стандартным образцам (с близким содержанием Nb), проведенным через все стадии анализа и содержащим соответствующее количество Ta, по формуле:

$$X=a \cdot (D_1/D_2) \cdot (V_2/V_1),$$

где  $a$  – количество Nb в стандартном образце, % (по массе);  $D_1/D_2$  – отношение оптической плотности исследуемого раствора к оптической плотности раствора стандартного образца;  $V_2/V_1$  – соотношения объемов аликвотных частей растворов стандартного и исследуемого образцов (при одинаковых навесках сплавов и равных объемах).

По описанной выше методике проанализированы на содержание Nb исследуемые образцы ЖНС, содержащие Nb и Ta. Результаты определения Nb в исследуемых образцах ЖНС представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### Результаты определения Nb в стандартных образцах сплавов ЖНС с искусственно введенным в них Ta при проведении статистической обработки

Условный номер исследуемого образца	Содержание Nb, % (по массе), по расчету	Число параллельных измерений $n$	Содержание Ta, % (по массе), по расчету	Среднее содержание Nb, % (по массе), полученное в исследуемых образцах
1	1,53	6	5	1,54±0,02
2	0,53	6	3	0,57±0,035
3	1,00	10	5	1,03±0,05

Из данных табл. 3 видно, что погрешность результатов определения Nb в исследуемых образцах ЖНС не превышает допускаемых отклонений, приведенных в ОСТ 1 90432–96, на методы анализа Nb в ЖНС.

### Обсуждение и заключения

В процессе выполнения данной работы разработана методика спектрофотометрического определения массовой доли Nb в жаропрочных никелевых сплавах в диапазоне 0,5–3,5% (по массе) при одновременном содержании в сплавах Ta (1–6% (по массе)) с погрешностью, не превышающей уровень допускаемого отклонения, указанного в ОСТ 1 90432–96, на методы анализа. Установлено, что Nb может быть определен в сплаве с реагентом сульфанилазо Э в присутствии Ta. Для повышения чистоты и точности про-

ведения эксперимента предлагается определять Nb (при одновременном присутствии в сплаве большого содержания Ta) с предварительным отделением Nb от основы сплава и мешающих определению Nb большинства легирующих элементов, при этом расчет содержания Nb производится по растворам стандартных образцов ЖНС с введением в них соответствующего количества стандартного раствора Ta. Установлена линейная зависимость оптической плотности от содержания Nb при фотометрировании стандартных растворов (диапазон концентраций 0,5–3,5% (по массе)), содержащих только Nb и смесь Nb с Ta. Выявлен уровень зависимости оптической плотности растворов с Nb и Ta от депрессирующего влияния Ta. Тантал не мешает определению ниобия при соотношении его содержания в сплаве к ниобию не более чем 1,5:1.

Данная методика позволяет повысить точность определения ниобия в никелевых сплавах с большим содержанием тантала. Методику можно применять для аттестационных исследований химического состава стандартных образцов никелевых жаропрочных сплавов, содержащих ниобий и одновременно тантал.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
5. Petrushin N.V., Svetlov I.L., Samoylov A.I., Morozova G.I. Physicochemical properties and creep strength of a single crystal of nickel-base superalloy containing rhenium and ruthenium //J. Mat. Res. (formerly metallkd). 2010. V. 101. №5. P. 594–600.
6. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.

7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных нагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
8. Морозова Г.И., Тимофеева О.Б., Петрушин Н.В. Особенности структуры и фазового состава высокорениевого жаропрочного сплава //МиТОМ. 2009. №2. (644). С. 10–16.
9. Kablov E.N., Petrushin N.V., Nazarkin R.M. Designing of intermetallic Ni<sub>3</sub>Al-based superalloy /In: 9-th liege conf. materials for advanced power engineering. 2010. P. 646–651.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых заготовок) из современных литейных высокожаропрочных сплавов /В сб. трудов научн.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург: Наука Сервис. 2011. Т. 1. С. 31–38.
11. Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам //Двигатель. 2010. №5(71). С. 36–37.
12. Кишкин С.Т., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Жаропрочные эвтектические сплавы /В сб. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ. 1994. С. 252–258.
13. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) //Материаловедение. 2010. №7. С. 24–28.
14. Евгенов А.Г., Неруш С.В. Технология получения порошков и полуфабрикатов припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом оптимизации расплава /В сб. тезисов докладов VI Всероссийской науч.-техн. конф. молодых специалистов. Секция 3. Технологическая. Уфа. 2011. С. 162.
15. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные и нанослойные эрозионностойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов //Металлы. 2010. №5. С. 39–51.

17. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
18. Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №3. С. 26–30. №4. С. 13–20.
19. Mosheer R. Analytical Chemistry of Niobium and tantalum. N.-Y. Pergamon Press. 1964. P. 78.
20. Чугаев Л.А. Исследования в области комплексных соединений. М.: Наука. 1962. Т. 1. С. 10.
21. Голубева И.А., Добкина В.М. Определение и анализ ниобия и тантала. М.: НИИ инф. Минцветмет СССР. 1971.
22. Елинсон С.В. Спектрофотометрия ниобия и тантала. М.: Атомиздат. 1973. 288 с.
23. Гибало И.М. Аналитическая химия ниобия и тантала. М.: Наука. 1967. 352 с.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
3. Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Thermal barrier coatings for turbine blades of high pressure promising GTD] //Metally. 2012. №1. С. 5–13.
4. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnykh splavov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.
5. Petrushin N.V., Svetlov I.L., Samoylov A.I., Morozova G.I. Physicochemical properties and creep strength of a single crystal of nickel-base superalloy containing rhenium and ruthenium //J. Mat. Res. (formerly metallkd). 2010. V. 101. №5. P. 594–600.
6. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnykh splavov s monokristallicheskoj i

- kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of GTE blades with single crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
7. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplogruzhen-nyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. C. 13–19.
  8. Morozova G.I., Timofeeva O.B., Petrushin N.V. Osobennosti struktury i fazovogo so-stava vysokoteplovogo zharoprochnogo splava [Features of the structure and phase composition vysokoteplovogo superalloy] //MiTOM. 2009. №2. (644). S. 10–16.
  9. Kablov E.N., Petrushin N.V., Nazarkin R.M. Designing of intermetallic Ni<sub>3</sub>Al-based super-alloy /In: 9-th liege conf. materials for advanced power engineering. 2010. P. 646–651.
  10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovykh (shihtovykh zagotovok) iz sovremennykh litejnykh vysokozharoprochnykh splavov [Production of cast semifinished (blanks of charge) from the modern foundry alloys highly heat] /V sb. trudov nauchn.-tehn. konf. «Problemy i perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroenija s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledo-vanij i NIOKR». Ekaterinburg: Nauka Servis. 2011. T. 1. S. 31–38.
  11. Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Vysokotemperaturnye Nb–Si kompozity – zamena monokristallicheskim nikelovym zharoprochnym splavam [High-Nb-Si composites - re-placing a single crystal nickel-base superalloy] //Dvigatel'. 2010. №5(71). S. 36–37.
  12. Kishkin S.T., Petrushin N.V., Svetlov I.L. Zharoprochnye jevtekticheskie splavy [Heat-resistant eutectic alloys] /V sb. Aviacionnye materialy na rubezhe HH–HHI vekov. M.: VIAM. 1994. S. 252–258.
  13. Lomborg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M. Novyj zharoprochnyj nikelovyj splav dlja diskov gazoturbinyh dvigatelej (GTD) i gazoturbinyh ustanovok (GTU) [New heat resistant nickel alloy disc turbine engine (GTE) and gas turbine units (GTU)] //Materialovedenie. 2010. №7. S. 24–28.
  14. Evgenov A.G., Nerush S.V. Tehnologija poluchenija poroshkov i polufabrikatov pri-poev dlja diffuzionnoj vakuumnoj pajki, poluchennykh metodom optimizacii rasplava [Technology for producing powders and semi solders for the diffusion of vacuum braz-ing, obtained by optimizing the melt] /V sb. tezisov dokladov VI Vserossijskoj nauch.-tehn. konf. molodykh specialistov. Sekcija 3. Tehnologicheskaja. Ufa. 2011. S. 162.

15. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protecting and strengthening the ion-plasma coatings for blades and other critical parts of the compressor turbine engine] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 71–81.
16. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Ionno-plazmennye i nanoslojnye jerozionnostojkie pokrytija na osnove karbidov i nitridov metallov [Ion-plasma and Nanolayer erosionproofed coatings based on carbides and nitrides] //Metally. 2010. №5. S. 39–51.
17. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-resistant and heat-resistant coatings for high-pressure turbine blades promising GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 60–70.
18. Mubojadzhjan S.A. Zashhitnye pokrytija dlja detalej gorjachego trakta GTD [Protective coatings for turbine engine hot section parts] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2011. №3. S. 26–30. №4. S. 13–20.
19. Mosheer R. Analytical Chemistry of Niobium and tantalum. N.-Y. Pergamon Press. 1964. P. 78.
20. Chugaev L.A. Issledovanija v oblasti kompleksnyh soedinenij [Research in the field of complex compounds]. M.: Nauka. 1962. T. 1. S. 10.
21. Golubeva I.A., Dobkina V.M. Opredelenie i analiz niobija i tantala [Identification and analysis of niobium and tantalum]. M.: NII inf. Mincvetmet SSSR. 1971.
22. Elinson S.V. Spektrofotometrija niobija i tantala [Spectrophotometry of niobium and tantalum]. M.: Atomizdat. 1973. 288 s.
23. Gibalo I.M. Analiticheskaja himija niobija i tantala [Analytical chemistry of niobium and tantalum]. M.: Nauka. 1967. 352 s.